



The University of Tehran Press

Smart Energy Management: Optimization of Solar Panels with Time-of-Use Pricing in Residential Buildings

Seyed Mostafa Mousavi¹ | Ali Roghani Araghi^{2*}

1. M.Sc. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mostafamousavi@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Assistant Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ali.roghani@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 05 December 2024
Revised 04 January 2025
Accepted 03 February 2025
Published Online 18 March 2025

Keywords:
Energy consumption optimization,
solar panels,
sustainable energy,
residential buildings,
TOU.

ABSTRACT

In recent years, the use of renewable energy sources, particularly solar panels, has gained attention as an effective solution for reducing environmental pollution and transmission and distribution network losses. These energy sources not only contribute to improving environmental conditions but also enhance the quality of life by reducing electricity costs in buildings. In this study, a particle swarm optimization algorithm has been employed to optimize the power generation of solar panels and reduce costs. Simulation results indicate that a 100 kW solar panel generates 80 kW of power at 11 a.m., with an average daily power consumption of 22.9 kWh. Moreover, the system has been able to generate 8,614 kWh of energy annually. Considering time-of-use pricing and utilizing the particle swarm optimization algorithm, electricity consumption costs have been reduced to zero, and the possibility of selling the generated electricity has been enabled, demonstrating the system's high efficiency under various conditions. This research can serve as a valuable guide for managers and policymakers in optimizing the use of renewable resources and reducing energy costs.

Cite this article: Mousavi, M. & Roghani Araghi, A. (2025). Smart Energy Management: Optimization of Solar Panels with Time-of-Use Pricing in Residential Buildings. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (2), 157-173. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390057.1122>



© Seyed Mostafa Mousavi, Ali Roghani Araghi **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390057.1122>

Introduction

Smart grids are the next generation of electricity distribution systems that, by using information and control technologies, enable the improvement of network performance and efficiency. These grids, particularly with smart meters in individual homes, can regularly exchange electricity consumption and pricing information between consumers and power suppliers. In addition to providing more accurate billing estimates, these technologies enable monitoring of home energy systems' status and reduce costs through real-time pricing. One of the main challenges in these networks is the accurate prediction of electricity demand at lower levels of the grid, such as individual homes, which requires complex data analysis and the use of advanced methods for processing this data.

Methodology

This research examines the use of solar panels to reduce energy costs in buildings. Optimization algorithms, particularly the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, have been employed to manage the optimal use of electricity generated by the panels and the purchase of electricity from the

grid. This approach, considering factors such as electricity pricing, solar panel production, and consumption needs, helps reduce costs and increase energy efficiency. As electricity prices and demand are continuously changing, using artificial intelligence algorithms to optimize electricity purchase costs from the grid is highly effective. The PSO algorithm, utilizing the group behavior of particles, can intelligently optimize household electricity consumption and reduce energy costs.

In this research, an objective function for optimizing electricity costs has been defined, which includes costs related to purchasing electricity and solar panel production data. This algorithm automatically makes optimal decisions regarding how to use the electricity produced by the solar panels and electricity purchased from the grid. Using this approach, energy consumption can be managed intelligently, and associated costs can be reduced. The model also considers parameters such as electricity pricing rates, the required power for household appliances, their usage hours, and the solar panel production capacity.

Key Results

Simulation results using the PVSyst software show that solar panels are capable of meeting the energy needs of buildings, with the annual energy production of the system equaling 8614 kWh. This energy production fully covers the building's energy needs and reduces dependence on the electricity grid. Additionally, peak energy consumption is observed in the late hours of the day when batteries are fully charged to use stored energy during low production or nighttime. Cost analysis indicates that with optimal use of solar panel production, the costs of purchasing electricity are reduced to zero. This optimization also allows for selling the produced electricity during peak load times, enhancing the profitability of the system.

Based on the results obtained, the optimized cost is calculated to be -295,800 Rials, indicating the profitability and high efficiency of the system under different consumption and production conditions. This research emphasizes that using **solar panels** as a renewable energy source, along with the use of **artificial intelligence algorithms**, can effectively contribute to **reducing energy costs** and **protecting the environment**. These systems can automatically and intelligently improve energy efficiency in buildings, contributing to sustainable development and energy resource management in the future.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مدیریت هوشمند انرژی: بهینه‌سازی پل‌های خورشیدی با قیمت‌گذاری زمان واقعی در ساختمان‌های مسکونی

سید مصطفی موسوی^۱ | علی روغنی عراقی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mostafamousavi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ali.roghani@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در سال‌های اخیر، استفاده از منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه پل‌های خورشیدی، به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش آلودگی زیست‌محیطی و تلفات در شبکه‌های انتقال و توزیع برق، مورد توجه قرار گرفته است. این منابع انرژی نه تنها به بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک می‌کنند، بلکه با کاهش هزینه‌های برق مصرفی در ساختمان‌ها، به بهبود کیفیت زندگی نیز می‌انجامند. در این مطالعه، به منظور مدیریت بهینه توان تولیدی پل‌های خورشیدی و کاهش هزینه‌ها، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهره گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند پل خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات در ساعت ۱۱ صبح، ۸۰ کیلووات توان تولید می‌کند و میانگین توان مصرفی روزانه برابر با ۲۲/۹ کیلووات ساعت بوده است. همچنین، سیستم توانسته است ۸۶۱۴ کیلووات ساعت انرژی سالانه تولید کند. با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری مبتنی بر زمان استفاده و استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، هزینه‌های برق مصرفی به صفر کاهش یافته و امکان فروش برق تولیدی نیز فراهم شده که نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم در شرایط مختلف است. این پژوهش می‌تواند راهگشای مدیران و سیاست‌گذاران در راستای استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر و کاهش هزینه‌های انرژی باشد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

کلیدواژه:

انرژی پایدار،

بهینه‌سازی مصرف انرژی،

پل خورشیدی،

ساختمان‌های مسکونی،

TOU.

استناد: موسوی، سید مصطفی و روغنی عراقی، علی (۱۴۰۴). مدیریت هوشمند انرژی: بهینه‌سازی پل‌های خورشیدی با قیمت‌گذاری زمان واقعی در ساختمان‌های مسکونی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۲) ۱۵۷-۱۷۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390057.1122>

© سید مصطفی موسوی، علی روغنی عراقی ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390057.1122>



۱. مقدمه

شبکه‌های برق هوشمند، نسل جدیدی از سیستم‌های توزیع برق هستند که با بهره‌گیری از فناوری‌های اطلاعاتی و کنترلی، بهبود عملکرد و بهره‌وری شبکه را امکان‌پذیر می‌سازند [۱]. توسعه و نصب این شبکه‌ها در سراسر جهان در حال گسترش است و یکی از اجزای کلیدی آن، دستگاه‌های شمارش هوشمند است که در خانه‌های فردی نصب می‌شوند و اطلاعات مصرف برق و قیمت‌ها را به صورت منظم بین مصرف‌کننده و تأمین‌کننده برق تبادل می‌کنند. این فناوری‌ها علاوه بر ارائه تخمین‌های دقیق‌تر برای صورتحساب برق، امکان نظارت بر وضعیت سیستم‌های انرژی خانگی و کاهش هزینه‌ها از طریق قیمت‌گذاری زمان واقعی را فراهم می‌کنند [۲].

یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های برق هوشمند، پیش‌بینی دقیق تقاضای برق در سطوح پایین شبکه، مانند خانه‌های فردی است. پیش‌بینی دقیق تقاضای برق زیاد نیازمند تحلیل حجم زیادی از داده‌های سری زمانی است که باید با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته و مقیاس‌پذیر پردازش شوند. از آنجا که پروفایل‌های تقاضا در سطح خانه‌ها نظم کمتری دارند، پیش‌بینی این داده‌ها به مراتب پیچیده‌تر است [۳]. برای بهبود عملکرد پیش‌بینی، مدل‌های مختلفی از جمله روش‌های سری زمانی و مدل‌های رگرسیون به کار گرفته شده‌اند، اما این مدل‌ها به دلیل عدم توانایی در پردازش روابط غیرخطی، قادر به ارائه دقیق پیش‌بینی نیستند [۴]. علاوه بر پیش‌بینی تقاضای برق، یکی دیگر از جنبه‌های حیاتی در شبکه‌های برق هوشمند، پیش‌بینی قیمت برق است. با آزادسازی قیمت برق در دهه ۱۳۹۰ و ایجاد بازار رقابتی، قیمت برق به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند [۵] و تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند قیمت سوخت و تأمین انرژی تجدیدپذیر قرار دارد. در این شرایط، مصرف‌کنندگان نیاز دارند که بدانند آیا قیمت برق از حدود مشخصی که برای آن‌ها تعیین شده فراتر رفته است تا بتوانند تصمیم به روشن یا خاموش کردن بار مصرفی بگیرند. این امر به دسته‌بندی دقیق قیمت‌ها و پیش‌بینی آن‌ها نیاز دارد [۶].

در حوزه تحقیقات مرتبط با برنامه‌ریزی زمانی و بهینه‌سازی استفاده از انرژی الکتریکی، مطالعات متعددی انجام شده است که اهمیت این موضوع را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، مطالعه Kinhekar و همکاران به بهینه‌سازی پاسخ به تقاضا با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پرداخته است. این روش باعث بهبود همگرایی منحنی بار سیستم توزیع برق و کاهش اوج بار و هزینه‌های عملیاتی برای مصرف‌کنندگان مسکونی می‌شود. نتایج با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده و بهینه‌تر بودن الگوریتم ازدحام ذرات نشان داده شده است [۷]. Raghavan و همکاران طی مطالعه‌ای برنامه‌ریزی روزانه سیستم ذخیره انرژی در ریزشبکه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را بررسی کرده‌اند. هدف، کاهش هزینه‌های مصرف‌کنندگان تحت قیمت‌گذاری پویا است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد الگوریتم ازدحام ذرات به کاهش ۱۴/۳۱ درصد هزینه‌ها و بهبود زمان‌بندی سیستم ذخیره انرژی کمک می‌کند [۸].

مطالعه Yu و همکاران به ارائه مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی ساختمان‌های سبز پرداخته است. این مدل بر اساس شبیه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی داخلی طراحی می‌شود و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی رفتار ساختمان‌ها استفاده می‌کند. نتایج مطالعه موردی در چین نشان‌دهنده تحلیل تعادل میان آسایش حرارتی و مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌ها است [۹]. Bre و همکاران طی مطالعه‌ای به بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی پرداخته‌اند. در این تحقیق، یک خانه تک‌خانواده در آرژانتین به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با استفاده از شبیه‌ساز EnergyPlus و تحلیل حساسیت، تأثیر متغیرهای طراحی بر عملکرد حرارتی بررسی شده است. سپس با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌ترین متغیرهای طراحی برای کاهش مصرف انرژی انتخاب شده‌اند [۱۰].

Qayyum و همکاران طی مطالعه‌ای بهینه‌سازی زمان‌بندی عملکرد لوازم خانگی هوشمند با استفاده از پنل فتوولتائیک در ریزشبکه‌ها را بررسی کرده‌اند. هدف کاهش هزینه برق، مدت زمان مصرف و نیاز انرژی با در نظر گرفتن محدودیت‌های کاربران است. نتایج نشان می‌دهند افزودن سیستم PV به خانه می‌تواند به کاهش قبوض برق و حتی صادرات انرژی اضافی به شبکه سراسری منجر شود [۱۱]. Joo و همکاران نیز در همین راستا یک الگوریتم بهینه‌سازی توزیع‌شده برای زمان‌بندی مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند چندانکه با منابع انرژی توزیع‌شده ارائه داده‌اند [۱۲].

Zhou و همکاران طی مطالعه‌ای استراتژی تخصیص ظرفیت فتوولتائیک و سیستم ذخیره انرژی باتری در یک خانه هوشمند را بررسی کرده‌اند. این مدل دوسطحی تأثیر قیمت‌گذاری برق، از جمله قیمت‌گذاری زمان استفاده، را در بهینه‌سازی تخصیص این سیستم‌ها در نظر می‌گیرد. هدف آن، یافتن راه‌حل بهینه برای کاهش مصرف برق و هزینه‌های انرژی در خانه‌های هوشمند است [۱۳]. Hassan طی مطالعه‌ای سیستم انرژی تجدیدپذیر برای تأمین برق ۱۰ خانوار را طراحی کرده است. این مطالعه به بررسی ۱۱ سیستم برق فتوولتائیک در عراق با هدف کمترین هزینه انرژی، بیشترین استفاده از انرژی تجدیدپذیر و کاهش انتشار CO₂ پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه هزینه کمتری دارد، زیرا انرژی اضافی به شبکه تزریق می‌شود، در حالی که در سیستم مستقل، انرژی تولیدی برای تأمین نیاز خانوارها و شارژ باتری‌ها مصرف می‌شود [۱۴].

ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و زمین‌گرایی می‌تواند به افزایش امنیت انرژی کشورها کمک کند. در همین راستا، Seyedrahimi و همکاران به بررسی اثرات اقتصادی و چالش‌های توسعه سیستم‌های زمین‌گرایی پرداخته‌اند و بر هزینه‌ها، خطرات سرمایه‌گذاری و زمان بازگشت سرمایه تأکید دارند. این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند هزینه‌های تولید انرژی را کاهش دهد و سیستم‌های پایدارتر و اقتصادی‌تری ایجاد کند [۱۵]. همچنین، ناصری، رازقی و همکاران طی پژوهشی به بررسی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های ترکیبی انرژی خورشیدی و خودروهای برقی پرداختند. این تحقیق نشان می‌دهد ترکیب «پنل‌های خورشیدی + خودروهای برقی» می‌تواند هزینه‌های انرژی را کاهش دهد و از انتشار گازهای گلخانه‌ای در مناطق شهری بکاهد. استفاده از خودروهای برقی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشد. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیستم‌های ترکیبی برای ایجاد انرژی پایدار و کاهش کربن در سطح شهری است [۱۶ و ۱۷]. در مطالعه‌ای از Ren و همکاران، به بهینه‌سازی ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک و باتری لیتیوم پرداخته شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد این ترکیب می‌تواند وابستگی به شبکه برق را کاهش داده و هزینه‌های تولید برق را کاهش دهد، با این حال همچنان نیاز به برق شبکه برای برخی تقاضاها وجود دارد [۱۸].

توانایی پیش‌بینی دقیق تقاضای برق در خانه‌های فردی به عنوان یک عامل کلیدی در مدیریت بهینه انرژی اهمیت بسیاری دارد. تأمین‌کنندگان انرژی خانگی که قادر به پیش‌بینی تقاضای آینده بر اساس داده‌های شمارش هوشمند هستند، می‌توانند ابزارهای پاسخ به تقاضا را به طور مؤثری به کار گیرند و مصرف انرژی را بر اساس نیازهای واقعی مصرف‌کنندگان تنظیم کنند. با این حال، پیش‌بینی تقاضای برق در سطوح پایین شبکه با چالش‌های متعددی مواجه است. یکی از چالش‌های مهم تحلیل حجم وسیع داده‌ها و استفاده از تکنیک‌های مناسب برای پردازش آن‌هاست. علاوه بر این، پروفایل‌های تقاضا در این سطح به دلیل نوسانات و نبود نظم کافی، پیش‌بینی را پیچیده‌تر می‌کند. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی بار مصرفی توسعه یافته‌اند که عمدتاً بر بهبود دقت پیش‌بینی متمرکز هستند. با این حال، روش‌های سنتی پیش‌بینی مانند مدل‌های سری زمانی و رگرسیون به دلیل عدم توانایی در تطابق با رفتارهای غیرخطی و پیچیدگی‌های تقاضا معمولاً دقت کافی را ارائه نمی‌دهند. علاوه بر این، قیمت برق که به عنوان یک مؤلفه مهم در مبحث مصرف انرژی شناخته می‌شود، تحت تأثیر عواملی نظیر قیمت سوخت و نیاز برق قرار دارد و مدام در حال تغییر است. این موضوع برای مصرف‌کنندگان اهمیت ویژه‌ای دارد تا بتوانند تصمیمات هوشمندانه‌ای در خصوص زمان استفاده از انرژی بگیرند.

هدف این تحقیق، بهینه‌سازی هزینه برق یک خانه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات است که به طور خاص برای مدیریت هوشمند و بهینه توان تولیدی پنل‌های خورشیدی طراحی شده است. در این مطالعه، توجه ویژه‌ای به برنامه‌ریزی زمانی مصرف انرژی الکتریکی شده است، به طوری که از خرید برق از شبکه و فروش برق به آن در زمان‌های مناسب به عنوان ابزارهایی برای کاهش هزینه‌ها استفاده می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری الگوریتم ازدحام ذرات به عنوان ابزاری هوشمند و کارآمد برای مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر است. این الگوریتم نه تنها به دقت پیش‌بینی کمک می‌کند، بلکه با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری زمان واقعی، به ایجاد شرایطی بهینه برای مدیریت بارهای الکتریکی کمک می‌کند. به واسطه این رویکرد نوآورانه، این مطالعه می‌تواند تحولی در بهینه‌سازی هزینه‌های برق مصرفی و بهره‌وری انرژی در خانه‌ها ایجاد کند.

۲. روش‌شناسی

این تحقیق به بررسی استفاده از پنل‌های خورشیدی برای کاهش هزینه‌های انرژی در ساختمان‌ها می‌پردازد. با توجه به نوسانات قیمت برق و تغییرات در تقاضا، الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند به طور هوشمند مصرف برق تولیدی توسط پنل‌ها و خرید از شبکه را مدیریت کنند. این رویکرد با در نظر گرفتن عواملی مانند قیمت برق، تولید پنل خورشیدی و نیاز مصرفی، به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی کمک می‌کند. استفاده از پنل‌های خورشیدی به عنوان یک منبع تجدیدپذیر برای تولید برق در ساختمان‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های انرژی و حفاظت از محیط زیست ایفا کند. به‌ویژه در شرایطی که قیمت برق و تقاضای انرژی مدام در حال تغییر است، به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی هزینه خرید برق از شبکه بسیار مؤثر خواهد بود. الگوریتم ازدحام ذرات، به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی، از رفتار گروهی ذرات برای یافتن بهترین حالت ممکن استفاده می‌کند [۱۹].

در این روش، یک تابع هدف تعریف می‌شود که شامل هزینه‌های مربوط به خرید برق و داده‌های تولید پنل خورشیدی است. الگوریتم ازدحام ذرات با استفاده از این تابع هدف می‌تواند به بهینه‌سازی هزینه خرید برق برای ساختمان‌های مجهز به پنل خورشیدی کمک کند. این الگوریتم می‌تواند به طور خودکار و هوشمند، تصمیم‌گیری درباره نحوه استفاده از برق تولیدی پنل خورشیدی و برق خریداری شده از شبکه را بهینه‌سازی کند [۲۰]. با این رویکرد، مصرف انرژی به طور هوشمند مدیریت می‌شود و هزینه‌های مربوطه کاهش می‌یابد. در فرایند بهینه‌سازی، پارامترهای متعددی مانند نوع نرخ هزینه برق، توان مورد نیاز وسایل خانگی، ساعت‌های استفاده از آن‌ها و توان تولیدی پنل خورشیدی نقش دارند. در ادامه، هریک از این پارامترها به طور کامل شرح داده خواهند شد تا نحوه تأثیر آن‌ها بر فرایند بهینه‌سازی مشخص شود.

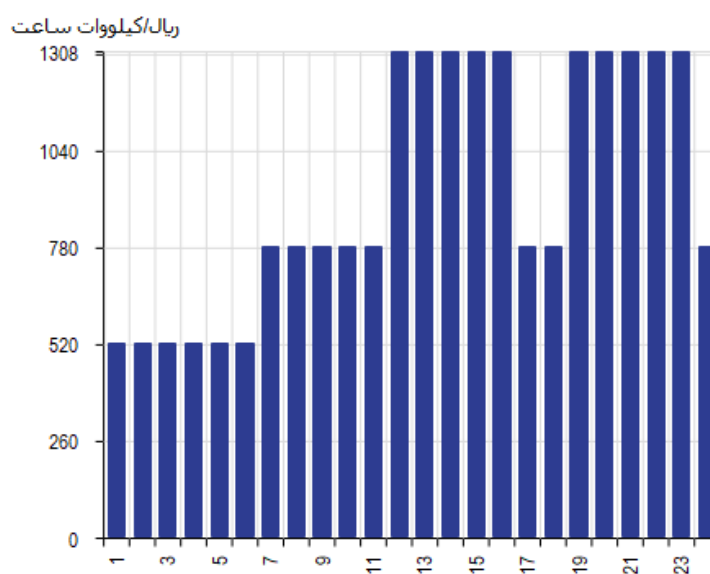
۲-۱. روش قیمت‌گذاری

قیمت‌گذاری برق توسط شرکت‌های توزیع برق، تولیدکنندگان برق و سازمان‌های مربوطه انجام می‌شود و معمولاً بر اساس مجموعه‌ای از عوامل مختلف تعیین می‌شود. این عوامل شامل موارد زیر هستند:

- هزینه تولید: هزینه تولید برق شامل هزینه‌های مرتبط با استفاده از منابع مختلف انرژی، نگهداری و به‌روزرسانی تجهیزات، هزینه نگهداری شبکه، تعمیرات و نگهداری نیروگاه‌ها، و سایر هزینه‌های تولید است. این هزینه‌ها تأثیر زیادی بر قیمت نهایی برق دارند.
- هزینه توزیع: هزینه توزیع برق به هزینه‌های انتقال برق از نیروگاه‌ها به مصرف‌کنندگان از طریق شبکه توزیع اشاره دارد. این هزینه‌ها می‌توانند بسته به زیرساخت‌های موجود و فاصله بین نیروگاه و مصرف‌کنندگان متفاوت باشند.
- قوانین و مقررات: قوانین و مقررات حاکم بر صنعت برق، از جمله مالیات‌ها، سود شرکت‌ها، حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر مسائل قانونی، تأثیر زیادی بر قیمت‌گذاری برق دارند. این موارد می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم قیمت‌ها را تحت تأثیر قرار دهند.
- تقاضا و عرضه: میزان تقاضا و عرضه برق در بازار نیز از عوامل مهم در تعیین قیمت برق است. در ساعت‌های اوج مصرف (ساعت‌های پیک) که تقاضا بالاست، قیمت برق ممکن است به طور قابل توجهی افزایش یابد. برعکس، در ساعت‌های کم‌مصرف، قیمت برق معمولاً کاهش می‌یابد.
- فناوری و نوآوری: پیشرفت‌های فناوری، بهبود کارایی نیروگاه‌ها، سیستم‌های توزیع و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش هزینه تولید برق و در نتیجه، کاهش قیمت آن منجر شود. این نوآوری‌ها همچنین می‌توانند باعث بهبود کارایی سیستم‌ها و کاهش اتلاف انرژی شوند.

این عوامل به طور پیچیده و هم‌زمان بر قیمت برق تأثیر می‌گذارند و در نهایت، باعث شکل‌گیری قیمت‌گذاری برق در بازار می‌شوند.

در مدل قیمت‌گذاری مبتنی بر زمان استفاده^۱، تعرفه‌های برق به طور پویا و بر اساس الگوهای زمانی متفاوت طی شبانه‌روز تنظیم می‌شوند. این مدل مصرف انرژی را به دو یا چند بازه زمانی اصلی تقسیم می‌کند که شامل ساعت‌های پربار، میان‌بار و کم‌بار است. ساعت‌های پربار معمولاً به دوره‌هایی گفته می‌شود که تقاضا برای مصرف برق بیشتر است، مانند اواسط روز یا اوایل شب، زمانی که فعالیت‌های روزمره و استفاده از وسایل برقی در اوج خود قرار دارند. در این دوره‌ها، قیمت برق افزایش می‌یابد تا مصرف‌کنندگان را به کاهش مصرف ترغیب کند و از بارگذاری بیش از حد شبکه جلوگیری شود. در مقابل، ساعت‌های کم‌باری معمولاً به شب‌ها و ساعت‌های اولیه صبح اشاره دارد که در آن تقاضا برای برق کمتر است. در این دوره‌ها، قیمت برق کاهش می‌یابد و مصرف‌کنندگان تشویق می‌شوند تا استفاده از وسایل برقی پرمصرف خود را به این زمان‌ها موکول کنند [۲۱]. این مدل به مصرف‌کنندگان کمک می‌کند تا با برنامه‌ریزی مصرف انرژی خود، هزینه‌های برق را به طور مؤثری کاهش دهند. مزیت این مدل برای سیستم‌های برق نیز در این است که با توزیع یکنواخت‌تر بار مصرفی طی روز، فشار روی شبکه کاهش می‌یابد و پایداری سیستم افزایش می‌یابد. استفاده از مبنای محاسبه مصرف زمانی نسبت به دیگر روش‌های قیمت‌گذاری نظیر حجم مصرفی، مزایای قابل توجهی دارد. یکی از مزایای اصلی این روش، انعطاف‌پذیری بیشتر در تطبیق با الگوهای مصرف واقعی است، به‌ویژه در شرایطی که مصرف انرژی طی روز متغیر است و تحت تأثیر زمان‌های مختلف قرار دارد. روش مصرف زمانی این امکان را فراهم می‌آورد که انرژی مصرفی در ساعت‌های مختلف روز با توجه به قیمت‌های متفاوت محاسبه شود، که باعث بهینه‌سازی هزینه‌ها در زمان‌های اوج مصرف و کاهش هزینه‌ها در ساعت‌های کم‌مصرف می‌شود. به طور کلی، مدل TOU با کمک به تعادل بهتر میان عرضه و تقاضای برق، با ارائه تعرفه‌های انعطاف‌پذیر، نه تنها به کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده منجر می‌شود، بلکه کارایی شبکه برق و استفاده بهینه از منابع را نیز بهبود می‌بخشد. شکل ۱ برش عمودی قیمت برق را بر اساس زمان مصرف نشان می‌دهد. نوسانات قیمت برق طی دوره زمانی مورد بررسی در این نمودار به‌وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۱. قیمت‌گذاری برق بر اساس TOU

۲-۲. لوازم خانگی و منطقه مطالعه شده

یکی از مؤلفه‌های کلیدی که تأثیر مستقیمی بر میزان برق مصرفی دارد، لوازم خانگی هستند. میزان مصرف برق این وسایل به عوامل مختلفی مانند تعداد، نوع، و نحوه استفاده از آن‌ها بستگی دارد. برای مثال، برخی از لوازم خانگی مانند یخچال باید مدام و به مدت ۲۴ ساعت در روز روشن باشند، در حالی که برخی دیگر مانند چراغ‌ها، تنها در ساعت‌های شب به کار گرفته می‌شوند. جدول توان مصرفی وسایل خانگی مختلف را به طور دقیق نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان مرجع در فرایند بهینه‌سازی

مصرف انرژی در نظر گرفته شود. در فرایند بهینه‌سازی، علاوه بر نحوه استفاده و تعداد وسایل، محدودیت‌هایی نیز باید مد نظر قرار گیرد. به عنوان مثال، برای یخچال، امکان خاموش کردن آن به طور موقت وجود ندارد و باید مدام فعال باشد، در حالی که برای سایر وسایل مانند تلویزیون یا ماشین لباسشویی، زمان‌های مشخصی برای استفاده ممکن است تعیین شود. این نوع محدودیت‌ها می‌توانند نقش مهمی در تنظیمات بهینه برای مصرف انرژی ایفا کنند.

جدول ۱. توان مصرفی وسایل مختلف

لوازم خانگی	توان مصرفی (وات)
لامپ	۵۶
تلویزیون و لپ‌تاپ	۱۸۰
جاروبرقی	۴۵۰
یخچال	۲۵۰
ماشین ظرفشویی و لباسشویی	۱۲۰۰
قهوه‌ساز	۱۳۰۰
مایکروویو	۱۰۰۰

در ادامه، با بررسی دقیق‌تر چگونگی استفاده از وسایل مختلف و زمان‌های مصرف آن‌ها، می‌توان به بهینه‌ترین راه‌حل‌ها برای کاهش هزینه‌های انرژی رسید.

پژوهش در زمینه استفاده از انرژی خورشیدی و باتری به عنوان منابع ذخیره‌سازی برق در سیستم‌های خورشیدی، نیازمند انتخاب منطقه‌ای با شرایط مناسب خورشیدی است. این منطقه باید دارای پتانسیل بالای تولید برق خورشیدی و همچنین نیاز به ذخیره‌سازی انرژی باشد. علاوه بر این، مناسب‌ترین مناطق برای چنین پروژه‌هایی باید با چالش‌هایی در شبکه برق مواجه باشند و به راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی نیاز داشته باشند. در این راستا، شهر مشهد به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. شرایط آب‌وهوایی این شهر، که تأثیر مستقیمی بر پتانسیل تولید انرژی خورشیدی و نیاز به ذخیره‌سازی برق دارد، در جدول ۲ ارائه شده است. این داده‌ها به منظور ارزیابی دقیق‌تر پتانسیل انرژی خورشیدی در مشهد و تحلیل نیازهای ذخیره‌سازی برق در این منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].

جدول ۲. مشخصات هواشناسی و تابشی مشهد [۲۳]

مکان جغرافیایی	
عرض جغرافیایی	۳۶/۲۳ °N
طول جغرافیایی	۵۹/۶۵ °E
ارتفاع (m)	۹۹۰
مقادیر هواشناسی و تابش	
انرژی خورشیدی افقی (kWh/m^2)	۱۶۹۴/۵
انرژی خورشیدی پخش شده (kWh/m^2)	۶۶۵/۵
شاخص وضوح (نسبت)	۰/۵۶
دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	۱۵/۸
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۲/۸

این انتخاب به دلیل ویژگی‌های خاص مشهد در تولید انرژی خورشیدی و چالش‌های موجود در سیستم برق‌رسانی آن، زمینه‌ساز تحقیقات مفیدی برای توسعه راه‌حل‌های بهینه در حوزه انرژی تجدیدپذیر است. درخور یادآوری است که در شرایط جوی خاص مانند بارندگی و برف مستمر در شهر مشهد، که تأثیر منفی بر تولید انرژی توسط پنل‌های خورشیدی دارد، سیستم به طور خودکار به حالت پشتیبانی از باتری‌ها تغییر وضعیت می‌دهد. در این شرایط، باتری‌ها می‌توانند انرژی مورد نیاز خانه را تأمین کنند و به این ترتیب از وابستگی فوری به شبکه برق جلوگیری می‌شود. با این حال، در صورتی که شرایط جوی نامساعد ادامه یابد

و میزان ذخیره انرژی در باتری‌ها کاهش یابد، سیستم به طور اتوماتیک به شبکه برق متصل شده و انرژی مورد نیاز از آن تأمین می‌شود. این روش به طور مؤثر شرایط جوی ناپایدار را مدیریت کرده و از کارایی سیستم در روزهای با شرایط جوی مناسب نیز محافظت می‌کند. بنابراین، در حالی که تولید انرژی از پنل‌های خورشیدی در شرایط جوی نامساعد ممکن است کاهش یابد، سیستم به گونه‌ای طراحی شده که به طور هوشمند از منابع دیگر برای تأمین انرژی استفاده کند و این قابلیت را دارد که عملکرد بهینه‌ای در شرایط مختلف ارائه دهد.

۲-۳. شبیه‌سازی پنل خورشیدی

در ایران، سیستم‌های متصل به شبکه خورشیدی عمدتاً برای انتقال و تزریق تمام برق تولیدی پنل‌های خورشیدی به شبکه برق ملی طراحی شده‌اند. در مقابل، در کشورهای اروپایی، امکان تزریق هم‌زمان برق تولیدی به شبکه و تأمین انرژی مصرف‌کنندگان خانگی نیز وجود دارد. به خلاف تصور عمومی، امکان ذخیره‌سازی برق تولیدی در سیستم‌های متصل به شبکه با استفاده از باتری‌ها نیز وجود دارد، که این فناوری در کشورهای توسعه‌یافته به طور گسترده‌ای به کار گرفته شده است. برای طراحی این سیستم‌ها، نرم‌افزار PVsyst به عنوان یک ابزار معتبر جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پروژه، شهر مشهد به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. اطلاعات آب‌وهوایی و تابش خورشیدی این شهر به عنوان ورودی به نرم‌افزار وارد می‌شود. با توجه به ساعت‌های طلوع و غروب خورشید، میزان استفاده از لامپ‌ها برای تأمین روشنایی محاسبه می‌شود. در این سیستم، باتری‌ها به عنوان منابع ذخیره‌سازی انرژی عمل کرده و برق تولیدشده را در خود ذخیره می‌کنند. این انرژی ذخیره‌شده می‌تواند در زمان‌های عدم تولید برق از پنل‌ها، مانند شب‌ها یا روزهای ابری، مورد استفاده قرار گیرد. مشخصات پنل خورشیدی و باتری‌ها مورد استفاده در این سیستم به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. این رویکرد نه تنها باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهره‌وری سیستم‌های خورشیدی می‌شود، بلکه امکان استفاده بهینه از انرژی خورشیدی تولیدی را در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز فراهم می‌کند.

جدول ۳. مشخصات و نوع پنل خورشیدی استفاده‌شده در نرم‌افزار PVsyst

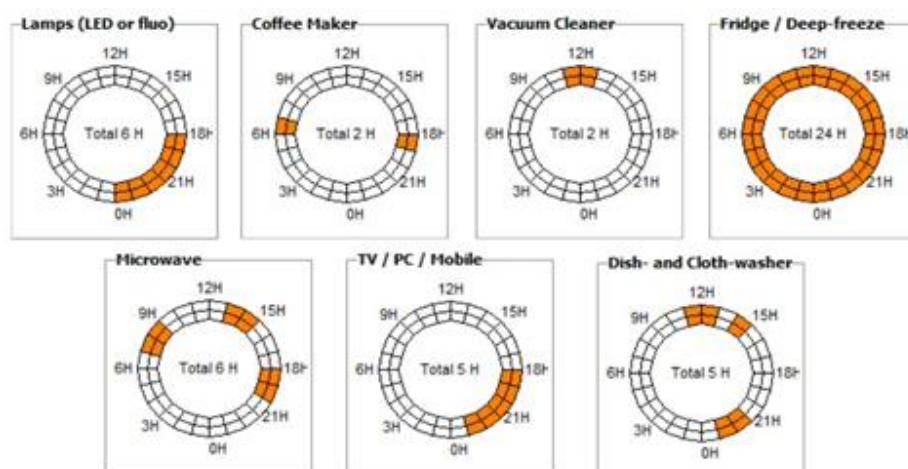
سیلیکون پلی کریستالی	فناوری
۳۱°	زاویه شیب
۰°	زاویه از شمال
۶/۶ kW	توان برنامه‌ریزی‌شده
۶۰ m ²	مساحت موجود
NSP	سازنده
۲۵۰ W	توان
۲۶ V	ولتاژ

جدول ۴. مشخصات و نوع باتری استفاده‌شده در نرم‌افزار PVsyst

لیتیوم-یون	نوع باتری
۱۲/۸ V	ولتاژ
۵۱ V	ولتاژ یک باتری
۲۱۶۳ Ah	ظرفیت کل
۹۹/۷ kWh	انرژی ذخیره‌شده

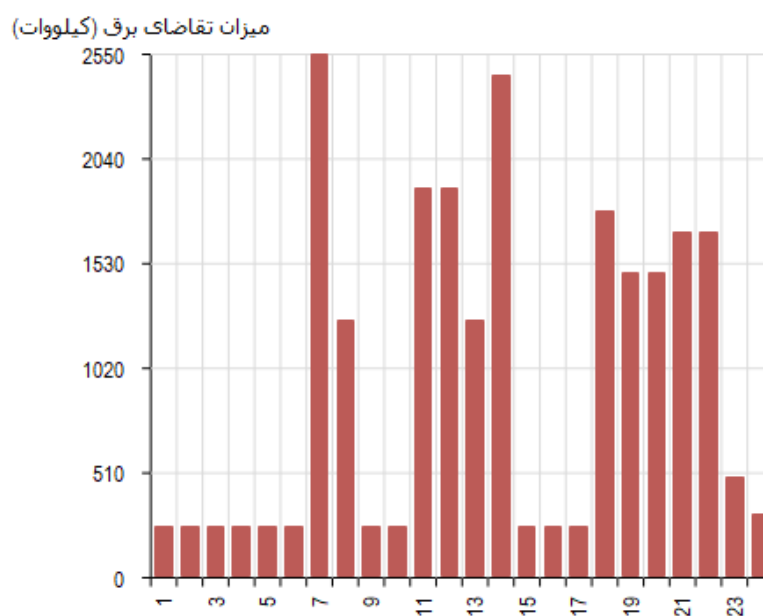
همان‌طور که اشاره شد، برای هر دستگاه خانگی، زمان‌های مشخصی برای روشن بودن تعیین شده است. برخی از وسایل، مانند یخچال، باید مدام و ۲۴ ساعت شبانه‌روز روشن باشند، در حالی که زمان روشن بودن سایر وسایل، مانند لپ‌تاپ، به صورت تصادفی و بسته به نیاز مصرف‌کننده وارد می‌شود. شکل ۲ زمان روشن بودن هر یک از وسایل خانگی را نشان می‌دهد. داده‌های

مربوط به زمان‌های روشن بودن دستگاه‌ها و بارگذاری آن‌ها در جدول ۲ بر اساس ارزیابی و نظر نویسندگان تعیین شده است و این زمان‌ها به طور کلی بر اساس تجربیات عملی و الگوهای مصرف رایج در محیط‌های خانگی تنظیم شده‌اند.



شکل ۲. زمان روشن بودن هر وسیله

با توجه به توان مصرفی هر دستگاه و زمان استفاده از آن‌ها، تقاضای برق برای هر وسیله به طور دقیق محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، یک یخچال با توان مصرفی ۲۵۰ وات که به مدت ۲۴ ساعت روشن است، تقاضای برق معادل ۶ هزار وات ساعت (معادل ۶ کیلووات ساعت) تولید می‌کند. با انجام این محاسبات برای تمامی لوازم خانگی، می‌توان تقاضای کلی برق خانه را به طور دقیق برآورد کرد. این میزان تقاضا در شکل ۳ نمایش داده شده است، که به تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند و امکان پیش‌بینی نیازهای انرژی خانه را فراهم می‌آورد.



شکل ۳. میزان توان مصرفی کلیه لوازم خانگی

۲-۴. الگوریتم ازدحام ذرات

در این پروژه، از الگوریتم ازدحام ذرات^۱ به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی برای مدیریت هزینه‌های برق مصرفی استفاده می‌شود. الگوریتم ازدحام ذرات یک الگوریتم بهینه‌سازی است که از رفتار گروهی ذرات در فضای جست‌وجو برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. این الگوریتم بر اساس تکنیک‌های الهام‌گرفته از رفتار گروهی حشرات و پرندگان عمل می‌کند [۲۴]. هر ذره در این الگوریتم به عنوان یک نقطه در فضای جست‌وجو عمل می‌کند و به دنبال بهینه‌سازی یک تابع هدف است. ویژگی‌های برجسته این الگوریتم عبارت‌اند از:

- محاسبات فضای چندبعدی که در قالب گام‌های زمانی انجام می‌شود (اصل پوشش).
- گروه ذرات به بهترین موقعیت‌های فردی و همسایگی واکنش نشان می‌دهند.
- تخصیص پاسخ‌ها بین بهترین موقعیت‌های فردی و گروهی تضمین‌کننده تنوع پاسخ‌ها است.
- تغییر وضعیت گروه تنها زمانی که بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت گروه تغییر کنند، اتفاق می‌افتد (اصل پایداری).
- رفتار تطبیقی گروهی، که به تغییرات در بهترین موقعیت‌ها پاسخ می‌دهد.

با این حال، الگوریتم ازدحام ذرات نیز ضعف‌های خاص خود را دارد. یکی از مشکلات اصلی آن احتمال به دام افتادن در بهینه‌های محلی است. اگرچه PSO نسبت به الگوریتم‌های تکاملی سرعت بالاتری دارد، اما معمولاً نمی‌تواند کیفیت رسیدن به راه‌حل را با افزایش تکرارها جبران کند و ممکن است در بهینه‌های محلی گیر کند. در این پروژه، الگوریتم ازدحام ذرات به طور خاص برای بهینه‌سازی هزینه‌های برق مصرفی استفاده می‌شود. این الگوریتم با استفاده از ویژگی‌های خود می‌تواند مصرف برق خانگی را با در نظر گرفتن زمان‌های مختلف مصرف و تولید انرژی خورشیدی بهینه کند و به کاهش هزینه‌های انرژی کمک کند. معادلات ۱ و ۲ [۲۵] برای به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات استفاده می‌شوند. در این معادلات، w ضریب اینرسی است که به صورت خطی کاهش می‌یابد. با استفاده از نمودار تقاضای بار متوسط یک خانه و قیمت خرید برق، مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود.

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + C_1 rand_1 \times (pbest - s_i^k) + C_2 rand_2 \times (pbest - s_i^k) \quad (1)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

C_1 و C_2 به عنوان ضرایب یادگیری معرفی می‌شوند. V_i^k سرعت ذره i ام در تکرار k ام است. مقدار w در هر تکرار بر اساس معادله ۳ [۲۳] کاهش می‌یابد:

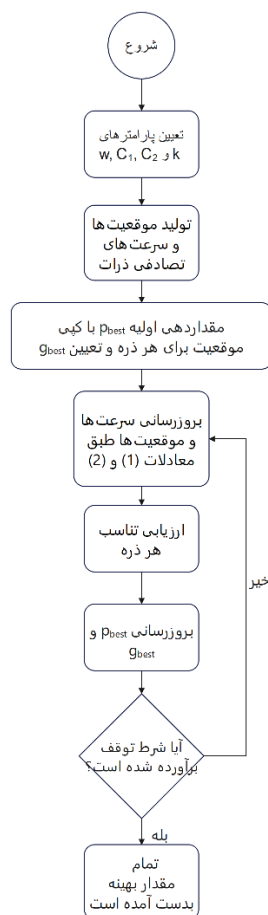
$$\frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (3)$$

در این رابطه w_{max} وزن ابتدایی، w_{min} وزن نهایی و $iter_{max}$ مقدار پیشینه تعداد تکرار است. روند الگوریتم ازدحام ذرات برای مدیریت و بهینه‌سازی هزینه برق مصرفی در شکل ۴ نشان داده شده است.

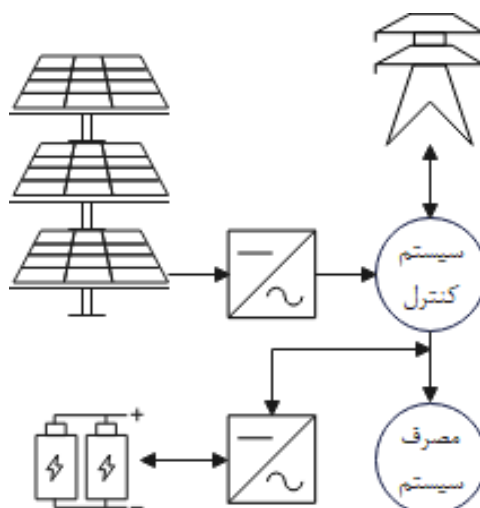
هزینه هر کیلووات برق تولیدشده از پیل خورشیدی ۹۰۰ ریال در نظر گرفته می‌شود و معادله ۴ به بررسی هزینه برق می‌پردازد:

$$MinZ = (TOU - SPV) Demand \quad (4)$$

در این رابطه، TOU نشان‌دهنده هزینه برق خریداری‌شده از شرکت تأمین‌کننده، SPV هزینه فروش برق تولیدشده از پیل خورشیدی و $Demand$ مقدار تقاضای برق در خانه است. محدودیت‌های این رابطه شامل نیاز به روشن بودن حداقل یک وسیله (یخچال) به مدت ۲۴ ساعت در روز است. در زمان‌هایی که برق توسط پیل خورشیدی تأمین می‌شود، هزینه TOU برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و ذخیره برق در باتری امکان استفاده پایدار از آن را فراهم می‌کند. شکل ۵ یک نمودار شماتیک از یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه را ارائه می‌دهد. این سیستم به شبکه برق متصل است و انرژی الکتریکی اضافی تولیدشده توسط سیستم می‌تواند به شبکه تزریق شود و در صورت نیاز، انرژی از شبکه دریافت کند.



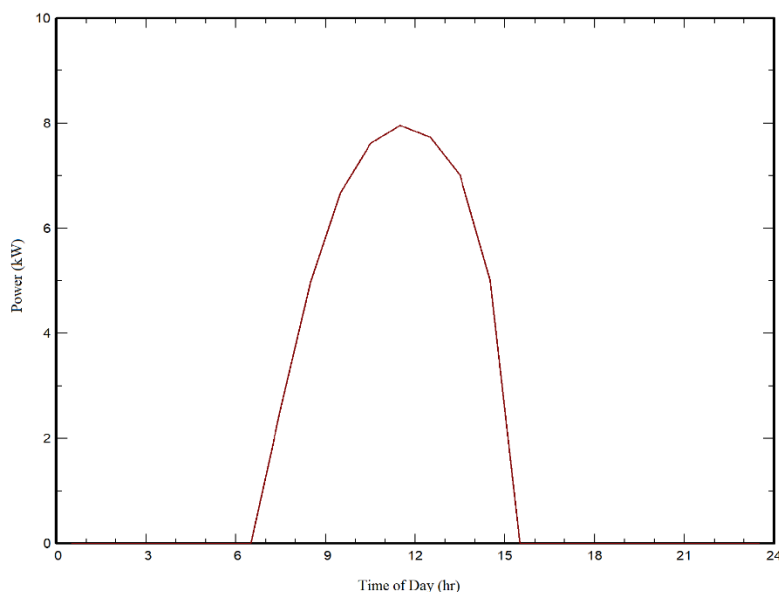
شکل ۴. مراحل پیشبرد الگوریتم PSO [۲۶]



شکل ۵. شماتیک فرایند

۳. نتایج شبیه‌سازی

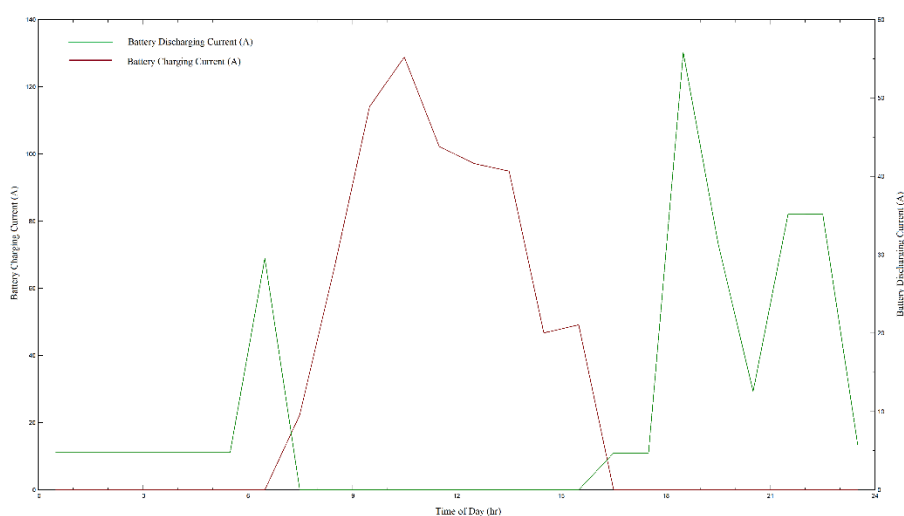
بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزار PVSyst و تحلیل داده‌های تولید انرژی، شکل ۶ نشان‌دهنده توان تولیدی سالانه پنل‌های خورشیدی است که مقدار متوسط انرژی تولیدی در بازه‌های زمانی مختلف را نمایش می‌دهد. برای مثال، یک پنل خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات در ساعت ۱۱ صبح حدود ۸۰ کیلووات توان تولید می‌کند، که این مقدار نشان‌دهنده عملکرد بهینه پنل در ساعت‌های اوج تولید است.



شکل ۶. متوسط توان تولیدی پنل خورشیدی در ساعات مختلف شبانه‌روز

با توجه به محاسبات انجام‌شده، میانگین توان مصرفی روزانه برابر با $22/9$ کیلووات ساعت است. پیک مصرف انرژی معمولاً در ساعات پایانی روز مشاهده می‌شود، که این موضوع نشان‌دهنده مدیریت بهینه استفاده از انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها است. این امکان به مصرف‌کنندگان کمک می‌کند تا در زمان‌هایی که تولید انرژی خورشیدی پایین است (مانند شب‌ها یا روزهای ابری)، از انرژی ذخیره‌شده استفاده کنند و مصرف انرژی خود را به طور مؤثری مدیریت کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پنل‌های خورشیدی با تولید سالانه 8614 کیلووات ساعت، قادر به تأمین کامل نیازهای انرژی ساختمان هستند. این میزان تولید نه تنها وابستگی به شبکه برق را کاهش می‌دهد، بلکه از بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساعات مختلف نیز پشتیبانی می‌کند. پیک مصرف انرژی در ساعات پایانی روز مشاهده می‌شود، که در این زمان‌ها باتری‌ها به طور کامل شارژ می‌شوند تا در ساعات کم تولید یا شب از انرژی ذخیره‌شده استفاده کنند.

مقدار شارژ و دشارژ باتری در شکل ۷ نشان داده شده است که نقش کلیدی باتری‌ها را در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها نمایان می‌کند. این فرایند ذخیره‌سازی انرژی در زمان‌های کم‌مصرف و استفاده از آن در زمان‌های اوج مصرف، به طور چشمگیری به بهبود بهره‌وری و کارایی سیستم انرژی خورشیدی کمک می‌کند.



شکل ۷. وضعیت شارژ و دشارژ باتری

تحلیل هزینه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه الگوریتم ازدحام ذرات، نشان می‌دهد در صورت استفاده بهینه از توان تولیدی پنل‌های خورشیدی، هزینه‌های خرید برق به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و حتی به صفر می‌رسد. این بهینه‌سازی باعث می‌شود که انرژی تولیدی پنل‌ها به طور کامل مصرف شود و نیازی به خرید برق از شبکه نباشد. علاوه بر این، امکان فروش برق تولیدی در زمان‌های اوج بار که قیمت برق بالا است، موجب افزایش سودآوری سیستم می‌شود. در این راستا، مقدار بهینه هزینه محاسبه شده برابر با ۲۹۵۸۰۰- ریال است که به‌وضوح کارایی بالای سیستم و پتانسیل سودآوری آن را نشان می‌دهد. این نتایج تأکید می‌کند که استفاده از پنل‌های خورشیدی به همراه مدیریت بهینه مصرف انرژی می‌تواند نه تنها به کاهش هزینه‌ها منجر شود، بلکه امکان درآمدزایی از طریق فروش انرژی به شبکه را نیز فراهم آورد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی سیستم پنل خورشیدی و تحلیل داده‌های مربوط به تولید و مصرف انرژی، چند نکته کلیدی در مورد کارایی و بهینه‌سازی هزینه‌های انرژی به‌دست‌آمده است:

- عملکرد سیستم پنل خورشیدی: شکل ۶ نشان‌دهنده متوسط توان تولیدی پنل خورشیدی در ساعت‌های مختلف روز است. به طور خاص، یک پنل خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات در ساعت ۱۱ صبح توان تولیدی قابل توجهی معادل ۸۰ کیلووات را فراهم می‌کند. این امر تأکیدی بر ظرفیت بالای سیستم در ساعت‌های اوج تولید انرژی است و نشان می‌دهد سیستم توانایی تأمین نیازهای انرژی در این ساعت‌ها را دارد.
 - مصرف انرژی: بر اساس محاسبات انجام‌شده با استفاده از خروجی نرم‌افزار PVSyst، میانگین توان مصرفی روزانه برابر با ۲۲/۹ کیلووات ساعت است. پیک مصرف انرژی در ساعات پایانی روز مشاهده می‌شود، که این موضوع نشان‌دهنده مدیریت بهینه استفاده از انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها است. در این ساعت‌ها، باتری‌ها به طور کامل شارژ می‌شوند تا در زمان‌هایی که تولید انرژی خورشیدی پایین است، مورد استفاده قرار گیرند.
 - تولید سالانه: میزان تولید سالانه انرژی سیستم برابر با ۸۶۱۴ کیلووات ساعت (معادل ۲۳/۶ کیلووات ساعت در روز) است. این مقدار تولید نشان‌دهنده توانایی کامل سیستم در تأمین نیازهای انرژی ساختمان است و به‌وضوح تأثیر مثبت آن در کاهش وابستگی به شبکه برق را نشان می‌دهد.
 - مدیریت هزینه‌ها: با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به‌کاررفته، شرایط ایده‌آل به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در صورت استفاده کامل از توان تولیدی پنل خورشیدی، هیچ هزینه‌ای به شرکت تأمین‌کننده برق پرداخت نمی‌شود. همچنین، در شرایط مختلف مصرف و تولید، توان ذخیره‌شده در باتری می‌تواند به تأمین تقاضای انرژی کمک کند. به طور خاص، مقدار بهینه هزینه محاسبه شده برابر با ۲۹۵۸۰۰- ریال است که سودآوری سیستم را نشان می‌دهد.
 - نتیجه‌گیری کلی: به طور کلی، استفاده از پنل خورشیدی به عنوان منبع تجدیدپذیر برای تولید برق، همراه با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی هزینه‌ها، نه تنها به کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند، بلکه به حفظ محیط زیست نیز منجر می‌شود. این سیستم‌ها به طور خودکار و هوشمند عمل می‌کنند و موجب بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها می‌شوند.
- در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ادغام پنل‌های خورشیدی با الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند رویکردی مؤثر در مدیریت انرژی و بهینه‌سازی هزینه‌های مصرف انرژی در ساختمان‌ها باشد. این رویکرد نه تنها به کاهش هزینه‌ها، بلکه به استفاده بهینه از منابع انرژی تجدیدپذیر و پایداری سیستم‌های انرژی کمک خواهد کرد.

۴. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی عملکرد سیستم پنل خورشیدی به عنوان یک منبع تجدیدپذیر برای تولید برق و بهینه‌سازی هزینه‌های انرژی در ساختمان‌ها پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار PVSyst نشان می‌دهد پنل خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات توان تولیدی قابل توجهی در ساعت‌های اوج تولید دارد. به طور خاص، در ساعت ۱۱ صبح، پنل خورشیدی تقریباً ۸۰ کیلووات توان تولید می‌کند، که به‌وضوح نشان‌دهنده ظرفیت بالای پنل خورشیدی در تأمین نیازهای انرژی ساختمان است. علاوه بر این، میانگین توان مصرفی روزانه برابر با ۲۲/۹ کیلووات ساعت بوده و با توجه به الگوی مصرف در ساعت‌های

مختلف روز، به‌ویژه در ساعت‌های پایانی روز، سیستم به‌خوبی توانسته است نیازهای انرژی ساختمان را تأمین کند. به‌علاوه، میزان تولید سالانه انرژی سیستم برابر با ۸۶۱۴ کیلووات ساعت است که این میزان تولید توانایی کامل سیستم در تأمین نیازهای انرژی ساختمان و کاهش وابستگی به شبکه برق را نشان می‌دهد. با به‌کارگیری الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی هزینه‌های خرید برق، نتایج نشان می‌دهد با مدیریت بهینه مصرف و تولید انرژی، هزینه‌های برق به صفر کاهش می‌یابد و علاوه بر آن، امکان فروش برق تولیدی نیز وجود دارد. این پژوهش مقدار بهینه هزینه را برابر با ۲۹۵۸۰۰-ریال محاسبه کرده است، که سودآوری و کارایی بالای سیستم در شرایط مختلف مصرف و تولید را نشان می‌دهد. در نهایت، این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده از پل‌های خورشیدی به عنوان منبع تجدیدپذیر همراه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند به طور مؤثری به کاهش هزینه‌های انرژی و حفظ محیط زیست کمک کند. این روش نه تنها به افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها منجر می‌شود، بلکه همچنین به توسعه پایدار و مدیریت منابع انرژی در آینده نیز کمک خواهد کرد. به این ترتیب، نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و پیاده‌سازی تکنولوژی‌های نوین در صنعت ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] A. Roghani Araghi, S.H. Hosseinian, G.B. Gharehpetian, B. Vahidi, "Employing TCPS for suppressing oscillations in two- area system constitute of wind farm and thermal system," *IEEE transactions on electrical and electronic engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 130-135, 2012.
- [2] C.-N. Yu, P. Mirowski, and T. K. Ho, "A sparse coding approach to household electricity demand forecasting in smart grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 738-748, 2016.
- [3] G. Zhang and J. Guo, "A novel method for hourly electricity demand forecasting," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 1351-1363, 2019.
- [4] J.-B. Fiot and F. Dinuzzo, "Electricity demand forecasting by multi-task learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 544-551, 2016.
- [5] H. Jahangir *et al.*, "A novel electricity price forecasting approach based on dimension reduction strategy and rough artificial neural networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2369-2381, 2019.
- [6] K. Wang, C. Xu, Y. Zhang, S. Guo, and A. Y. Zomaya, "Robust big data analytics for electricity price forecasting in the smart grid," *IEEE Transactions on Big Data*, vol. 5, no. 1, pp. 34-45, 2017.
- [7] N. Kinhekar, N. P. Padhy, and H. O. Gupta, "Particle swarm optimization based demand response for residential consumers," in *2015 IEEE power & energy society general meeting*, 2015: IEEE, pp. 1-5.
- [8] A. Raghavan, P. Maan, and A. K. Shenoy, "Optimization of day-ahead energy storage system scheduling in microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 173068-173078, 2020.
- [9] W. Yu, B. Li, H. Jia, M. Zhang, and D. Wang, "Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design ", *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 135-143, 2015.
- [10] F. Bre, A. S. Silva, E. Ghisi, and V. D. Fachinotti, "Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 853-866, 2016.
- [11] F. A. Qayyum, M. Naeem, A. S. Khwaja, A. Anpalagan, L. Guan, and B. Venkatesh, "Appliance scheduling optimization in smart home networks," *IEEE access*, vol. 3, pp. 2176-2190, 2015.
- [12] I.-Y. Joo and D.-H. Choi, "Distributed optimization framework for energy management of multiple smart homes with distributed energy resources," *Ieee Access*, vol. 5, pp. 15551-15560, 2017.
- [13] L. Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai, and P. Yang, "Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms," *IEEE access*, vol. 6, pp. 41050-41059, 2018.
- [14] Q. Hassan, "Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification," *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 375-390, 2021.
- [15] M. Seyedrahimi-Niaraq and T. Nouri, "Investigating the Economic Effects and the Roadmap of Developing Geothermal Systems to Generate Electricity," *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 9, no. 3, pp. 52-64, 2022, doi: 10.30501/jree.2022.317375.1290.
- [16] A. Naseri, A. Roghani Araghi, M. Razeghi, Y. Noorollahi, "Systematic site selection solar-powered electric vehicle charging stations: A novel approach to sustainable transportation," *Energy Strategy Reviews*, 56, 101596.
- [17] M. Razeghi, A. Roghani Araghi, A. Naseri, H. Yousefi, "Strategic deployment of GIS-optimized solar charging stations for electric vehicles: A multi-criteria decision-making approach", *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100712.
- [18] H. K. Ren, M. McCulloch, and D. Wallom, "Optimal sizing of solar photovoltaic and lithium battery storage to reduce grid electricity reliance in buildings," *arXiv preprint arXiv:2306.03581*, 2023.
- [19] A. Kumar, M. Alaraj, M. Rizwan, and U. Nangia, "Novel AI based energy management system for smart grid with RES integration," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 162530-162542, 2021.

- [20] B. Sanduru, A. S. Negi, N. Sharma, L. Bhalla, G. Kalele, and A. Vyas, "Particle Swarm Optimization for Sizing of Solar-Wind Hybrid Microgrids," in *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 537: EDP Sciences, p. 03011 .
- [21] Y.-C. Hung and G. Michailidis, "Modeling and optimization of time-of-use electricity pricing systems," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4116-4127, 2018.
- [22] E. Jahani, S. S. Sadati, and M. Yousefzadeh, "Assessment of solar data estimation models for four cities in Iran," *physica status solidi (c)*, vol. 12, no. 9- 11, pp. 1272-1275, 2015.
- [23] N. S. R. Database. <https://nsrdb.nrel.gov/> (accessed 02/25/2025).
- [24] M. Juneja and S .Nagar, "Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review," in *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, 2016: IEEE, pp. 1-5 .
- [25] M. Jaberipour, E. Khorram, and B. Karimi, "Particle swarm algorithm for solving systems of nonlinear equations," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 62, no. 2, pp. 566-576, 2011.
- [26] A. Safari, "A PSO procedure for a coordinated tuning of power system stabilizers for multiple operating conditions ", *Journal of applied research and technology*, vol. 11, no. 5, pp. 665-673, 2013.